

Il livello fisico

Parte V

TRASMISSIONE SENZA FILI.....	1
<i>Introduzione: le onde elettromagnetiche</i>	1
Generalità sulle radiocomunicazioni.....	3
Classificazione delle onde elettromagnetiche.....	3
Servizi di radiocomunicazione basati su radioonde.....	5
Ponte radio (cenni).....	6
Caratteristiche di propagazione nelle varie bande	7
Assegnazione delle bande	8
<i>Le onde radio</i>	9
Propagazione delle onde radio	9
<i>Trasmissione a microonde</i>	13
<i>Onde infrarosse e millimetriche</i>	17
<i>Trasmissione ad onde luminose</i>	18

Trasmissione senza fili

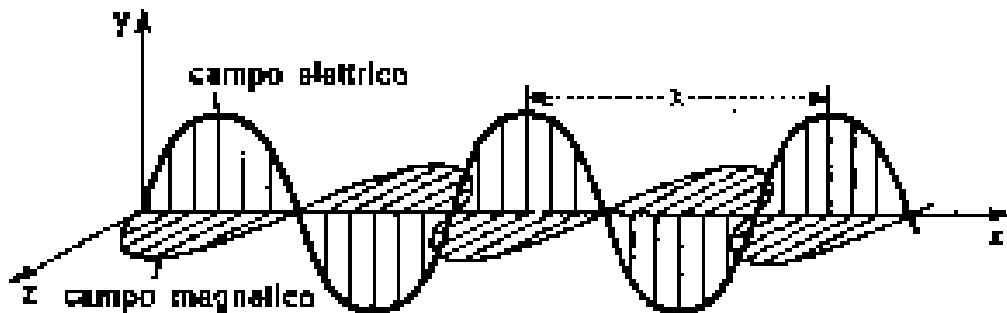
Introduzione: le onde elettromagnetiche

E' noto che il movimento degli elettroni genera un' **onda elettromagnetica** che può propagarsi nello spazio ⁽¹⁾ (anche nello *spazio vuoto*), ad una data velocità. Collegando i morsetti di uscita di una *antenna* ad un circuito elettrico (genericamente parliamo di *carico* dell'antenna), tra di essi viene indotta una corrente elettrica a seguito dell'incidenza dell'onda elettromagnetica sull'antenna stessa. Ci occupiamo allora, con sufficiente dettaglio, di questo particolare tipo di trasmissione di segnali a distanza, ormai sempre più diffuso data l'ovvia convenienza di non dover stendere cavi appositi.

Le onde elettromagnetiche furono previste da **Maxwell** nel 1865 e poi prodotte e osservate per la prima volta da **Hertz**, nel 1887. La figura seguente propone una

¹ Come anche su un cavo, come descritto in precedenza

semplice schematizzazione di un'onda elettromagnetica che si propaga nella direzione x del sistema di riferimento prescelto:



In particolare, quello riportato è il tipico andamento di campo elettrico (nel piano xy) e campo magnetico (nel piano xz) di un'onda **piana uniforme**: si tratta di un tipo molto importante in quanto si può dimostrare che l'onda elettromagnetica irradiata da una qualsiasi sorgente presenta, a distanza sufficientemente elevata da questa, le caratteristiche di un'onda piana uniforme.

In questa sede, i parametri caratteristici di interesse di un'onda elettromagnetica sono ancora una volta la **frequenza** (misurata in Hz e rappresentativa del numero di oscillazioni al secondo), la **lunghezza d'onda** (misurata in metri e corrispondente alla distanza tra due massimi - o minimi - consecutivi dell'oscillazione) e la **velocità di propagazione** (misurata in m/s).

Nello spazio vuoto, tutte le onde viaggiano alla stessa velocità a prescindere dalla frequenza: tale velocità è la **velocità della luce** e vale approssimativamente $3 \cdot 10^8$ m/s (cioè 300000 km al secondo!). Nei fili di rame o nelle fibre ottiche, invece, la velocità rallenta fino a circa 2/3 di questo valore e, come si è già detto, diventa anche parzialmente dipendente dalla frequenza: nella maggior parte dei casi, i calcoli per questi mezzi vengono fatti ipotizzando una velocità di propagazione dei segnali (o dei bit, nel caso della trasmissione digitale) di $2 \cdot 10^8$ m/s, costante con la frequenza.

La velocità della luce è il limite di velocità estremo: nessun oggetto o segnale si può muovere più velocemente.

La velocità della luce è anche la costante di proporzionalità tra frequenza e lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica nel vuoto:

$$\lambda \cdot f = c$$

Questa è la relazione che consente di associare una lunghezza d'onda ad una data frequenza e viceversa. Si tratta ovviamente di una relazione di proporzionalità inversa: al crescere di f diminuisce λ e viceversa.

Generalità sulle radiocomunicazioni

In generale, si parla di **sistemi di radiocomunicazione** per indicare quei sistemi di trasmissione di informazioni a distanza basati sull'impiego, come *segnali portanti*, di onde elettromagnetiche comprese entro un intervallo di frequenze opportune.

Queste onde viaggiano da un **radiotrasmettitore** (o stazione trasmittente o sorgente o brevemente **TX**) ad un **radioricevitore (RX)**. Le informazioni (che possono essere conversazioni nella radiotelefonia oppure segnali in codice telegrafico nella radiotelegrafia o ancora parole e musica nella radiodiffusione o immagini e suoni nella televisione) sono prima convertite da un **trasduttore** (microfono, codificatore telegrafico, telecamera, ecc.) in segnali elettrici (correnti e tensioni) di ampiezza variabile nel tempo; in seguito, tali segnali vanno ad agire, mediante il processo di **modulazione** (di ampiezza, di fase o di frequenza), su un'onda, detta **portante**, generata da un opportuno circuito elettrico oscillante presente nel radiotrasmettitore (**oscillatore locale**). Il segnale così ottenuto (detto **segnale modulato**), dopo una necessaria amplificazione, viene inviato all'**antenna trasmittente**, la quale lo irradia nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche. I ricevitori, più o meno distanti, captano le onde elettromagnetiche mediante un'**antenna ricevente** e, dopo un indispensabile processo di amplificazione e demodulazione, ricavano in uscita l'informazione emessa in trasmissione.

Classificazione delle onde elettromagnetiche

Lo **spettro elettromagnetico**, cioè l'insieme di tutte le frequenze a partire da 0 Hz fino teoricamente all'infinito, viene convenzionalmente suddiviso in **bande**. Ogni banda ha un proprio nome ed è generalmente caratterizzata da particolari caratteristiche di propagazione delle corrispondenti onde elettromagnetiche. In questo paragrafo ci occupiamo specificamente dei nomi attribuiti alle varie bande, rimandando a dopo l'esame delle caratteristiche di propagazione.

Possiamo citare almeno tre diverse classificazioni delle onde elettromagnetiche. La prima classificazione, introdotta dall' **ITU** (*International Telecommunication*

Union), prevedeva che le bande fossero semplicemente indicate con una sigla corrispondente alla lunghezza d'onda: ad esempio, le onde a bassissima frequenza erano indicate con la sigla **VLF**, che sta appunto per *Very Low Frequency*.

Successivamente, a questa classificazione è stata aggiunta un'altra che assegnava un numero N a ciascuna banda di frequenza: la banda N° comprende le onde la cui frequenza va da $0.3 \cdot 10^N$ Hz e $3 \cdot 10^N$ Hz. Così facendo, si è ottenuta la seguente classificazione (detta **classificazione internazionale delle onde hertziane**):

Frequenza	Denominazione	Lunghezza d'onda	Simbolo	Banda
<30 kHz	O. miriametriche o a bassissima frequenza	> 10 km	VLF	4
30÷300 kHz	O. chilometriche o a bassa frequenza	1000÷100 m	LF	5
300÷3000 kHz	O. ettometriche o a media frequenza	100÷10 m	MF	6
3÷30 MHz	O. decametriche o a alta frequenza	10÷1 m	HF	7
30÷300 MHz	O. metriche o ad altissima frequenza	1÷0.1 m	VHF	8
300÷3000 MHz	O. decimetriche o a frequenza ultraalta	100÷10 cm	UHF	9
3÷30 GHz	O. centimetriche o a frequenza superalta	10÷1 cm	SHF	10
30÷300 GHz	O. Millimetriche o a frequenza estremamente alta	10÷1 mm	EHF	11

La terza ed ultima classificazione di rilievo è la cosiddetta **classificazione radiotecnica**, che assegna le seguenti nuove denominazioni:

Frequenza	Denominazione	Lunghezza d'onda
<150 kHz	O. lunghissime	> 2 km
150÷300 kHz	O. lunghe	2÷1 km
300÷500 kHz	O. mediolunghe	1000÷600 m
500÷1500 kHz	O. medie	600÷200 m
1.5÷3 MHz	O. mediocorte	200÷100 m
3÷15 MHz	O. corte	100÷20 m
15÷30 MHz	O. cortissime	20÷10 m
30÷300 MHz	O. ultracorte	10÷1 m
> 300 MHz	Microonde ⁽²⁾	< 1m

² Per le microonde si ha poi una ulteriore classificazione.

In generale, è importante chiarire un concetto circa la terminologia: solo le onde elettromagnetiche a frequenze comprese approssimativamente tra 3 kHz e 300 MHz sono dette propriamente **onde radio** (o **radioonde**), mentre le onde a frequenze esterne a questo intervallo prendono altri nomi, come **microonde** o **raggi ultravioletti** o altro. Di conseguenza, mentre spesso il termine “radioonde” è erroneamente usato come sinonimo di onde elettromagnetiche, noi lo useremo nel modo corretto.

Servizi di radiocomunicazione basati su radioonde

I servizi che utilizzano le radioonde possono essere classificati, in modo semplificato, come segue:

- smistamento del traffico commerciale via ponte radio su onde ultracorte e microonde oppure con radioonde su onda corta via ionosfera o anche con microonde tramite i satelliti artificiali per telecomunicazioni;
- diffusione di programmi radiofonici che vengono trasmessi nelle bande delle onde lunghe, medie, corte e ultracorte;
- radioassistenza alla navigazione aerea e navale, realizzate prevalentemente su onde lunghe, corte, ultracorte e microonde;
- servizi di pubblica utilità, specie nell’ambito delle comunità urbane e suburbane, prevalentemente realizzate mediante ripetitori su onde ultracorte e microonde (particolarmente adatti per l’espletamento del servizio su mezzi mobili);
- teleoperazioni (ossia telecomandi, telemisurazioni, telecontrolli e così via), prevalentemente per impieghi industriali e per la ricerca scientifica, ambito nel quale operano satelliti artificiali per la navigazione;
- impieghi militari generalmente espletati sulle bande delle microonde;
- traffico dei radioamatori.

Le specifiche frequenze di lavoro relative ai vari servizi vengono scelte nell’ambito dei vari intervalli di frequenza definiti a livello internazionale, in modo da evitare, per quanto possibile, interferenze o intralcio nell’espletamento dei servizi stessi.

Tanto per completare la panoramica, nella seguente tabella vengono elencate le ampiezze di banda tipiche dei principali mezzi trasmissivi usati al giorno d'oggi:

Range di frequenze (Hz)	Sigla	Uso principale
10^3	-	Canali telefonici
10^4	VLF	Canali telefonici speciali
10^5	LF	Cavi coassiali sottomarini
10^6	MF	Cavi coassiali terrestri (trasmissione dati ad alta velocità)
10^7	HF	Cavi coassiali terrestri e onde corte
10^8	VHF	Cavi coassiali terrestri, diffusione TV e radio vhf
10^9	UHF	Diffusione TV UHF
10^{10}	SHF	Guide d'onda e microonde
10^{11}	EHF	Guide d'onda elicoidali
$10^{12}-10^{13}$	-	Trasmissione a raggi infrarossi su brevi distanze
$10^{14}-10^{15}$	-	Fibre ottiche
$10^{19}-10^{23}$	-	Raggi X e raggi gamma

Ponte radio (cenni)

L'espressione **ponte radio** è usata per indicare un collegamento nel quale le onde emesse dall'estremo trasmittente si dirigono verso l'estremo ricevente in fascio più o meno ristretto, formando, per così dire, un ponte tra i due estremi (detti **stazioni terminali**). Se, come molto spesso avviene, le condizioni di propagazione impongono di realizzare il collegamento in più **tratte**, allora varie stazioni ricetrasmittenti (dette **stazioni ripetitrici**) sono intercalate tra una tratta e l'altra, come i piloni di un ponte vero e proprio.

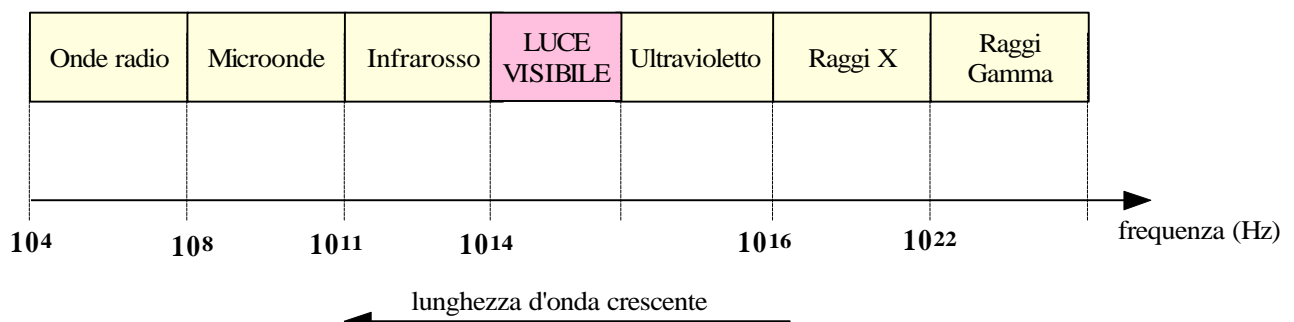
In relazione al tipo di informazione trasmessa, si hanno ponti radio telefonici, telegrafici, televisivi e così via. A seconda che si possano usare simultaneamente una o più vie di comunicazione si hanno ponti radio **monocanale** o **pluricanale**: per esempio, nei ponti radio telefonici è possibile convogliare migliaia di canali contemporanei.

La gamma di radiofrequenze su cui lavorano i **ponti radio a larga banda** va da qualche centinaio a qualche migliaio di MHz: come vedremo meglio più avanti, si tratta di frequenze che, se da una parte consentono la direttività del fascio trasmesso, dall'altra richiedono, per dare buone condizioni di propagazione del segnale, **visibilità radio** tra il punto di partenza e quello di arrivo. Questa è la condizione fondamentale che, insieme all'attenuazione nella propagazione ed alla scelta di località facilmente accessibili (in vicinanza a linee di energia ed a centri

abitati per i servizi e la sorveglianza), determina la posizione delle stazioni ripetitrici intermedie ed il numero delle tratte di collegamento. Nella pratica, le singole tratte hanno quasi sempre lunghezza inferiore a **100 Km**.

Caratteristiche di propagazione nelle varie bande

La figura seguente riporta una semplice panoramica dello spettro elettromagnetico già precedentemente descritto:



Le porzioni radio, microonde, infrarossi e luce visibile dello spettro possono essere tutte usate per trasmettere informazioni: bisogna *modulare* opportunamente l'ampiezza, la frequenza o la fase di una singola **onda portante sinusoidale** tramite i segnali che si intende trasmettere. La luce ultravioletta, i raggi X ed i raggi gamma sarebbero ancora migliori grazie alle frequenze così elevate, ma sono onde difficili da produrre e modulare, non si propagano bene attraverso gli edifici e sono pericolose per gli esseri viventi.

Possiamo dire in modo sintetico quanto segue:

- le **onde radio** a bassa frequenza (qualche decina di kHz) passano attraverso gli edifici, percorrono lunghe distanze e vengono quasi completamente riflesse dalla **ionosfera** verso il basso, per cui vengono sostanzialmente forzate a propagarsi “lungo” il suolo ⁽³⁾;
- a frequenze più elevate (dalle **microonde** in su), le onde sono estremamente **direzionali** (il che è un bene per i collegamenti punto-punto tra un trasmettitore

³ In pratica, a queste frequenze il suolo e la ionosfera si comportano come conduttori, sia pure con conducibilità abbastanza inferiore a quella dei metalli tradizionali, e formano così una specie di guida d'onda all'interno della quale le onde vengono appunto “guidate”.

ed un ricevitore posti in *visibilità radio* uno dell'altro), ma vengono fermate dagli **ostacoli** (edifici, colline ma anche più semplicemente gocce di pioggia!);

- in tutti i casi, le onde sono soggette a **interferenze elettromagnetiche**;
- la trasmissione di onde radio, almeno alle basse frequenze, è inerentemente di tipo **broadcast**, nel senso che non vengono privilegiati specifici utenti, ma i segnali sono intercettabili da chiunque abbia gli apparati riceventi appositi (4).

Assegnazione delle bande

Per evitare il caos totale, esistono accordi nazionali ed internazionali per assegnare i permessi di usare le frequenze dello spettro elettromagnetico. Dato che tutti desiderano una maggiore velocità di trasmissione, tutti vogliono più spettro. Negli Stati Uniti, ad esempio, l'ente che si occupa di assegnare le bande di frequenza è la **FCC**: essa assegna porzioni di spettro per radio AM e FM, televisione, telefoni cellulari e molto altro.

A livello mondiale, la ripartizione delle frequenze è a cura di una agenzia dell'ITU, denominata **WARC**. Ad esempio, nel 1991 la WARC assegnò le porzioni di spettro per gli *strumenti portatili di comunicazione personale*. Tuttavia, ci sono enti non vincolati alle decisioni della WARC, come ad esempio proprio la FCC: di conseguenza, spesso alcuni sistemi funzionanti su certe frequenze in certe parti del mondo non possono funzionare negli Stati Uniti e viceversa.

La maggior parte delle trasmissioni senza filo, al fine di ottenere migliori prestazioni in termini di qualità di ricezione a fronte di una data potenza trasmessa, usa una banda di frequenza ristretta, intendendo con questo che è piccolo il rapporto $\Delta f/f$ tra la banda in questione e la frequenza centrale su cui è allocata (si parla propriamente di **banda relativa**). Ci sono del resto dei casi in cui la tecnologia utilizza suggerisce invece l'uso di una banda decisamente più larga: si parla in questo caso di *spettro diffuso* (in inglese **spread spectrum**) ed un tipico esempio è quello dei futuri *sistemi radiomobili cellulari di terza generazione* (che in Europa sono noti sotto la sigla **UMTS**). La tecnologia dello spread spectrum era diffusa, fino a qualche tempo fa, quasi esclusivamente in ambito militare, in quanto rende molto difficile rilevare le trasmissioni (che risultano al di sotto della *soglia di rumore*) e tanto meno disturbarle.

⁴ Naturalmente, una cosa è intercettare un segnale tramite una antenna e altra cosa è poter usare questo segnale: ad esempio, chiunque dispone di una *parabola* puntata su un *satellite* può ricevere i segnali da esso trasmessi, ma potrà visualizzare qualcosa sul proprio televisore solo se può decodificare i segnali ricevuti, il che può avvenire avendo a disposizione un *decoder* e una *smart card* che consenta di farlo funzionare.

Le onde radio

Le **onde radio** (o *radioonde* o *onde hertziane*) sono onde elettromagnetiche a frequenze comprese tra qualche kHz a circa 300 MHz. Sono molto facili da generare, possono viaggiare per lunghe distanze e penetrano facilmente all'interno degli edifici, il che le rende molto utili (ed infatti sono largamente usate) per la comunicazione sia interna sia esterna.

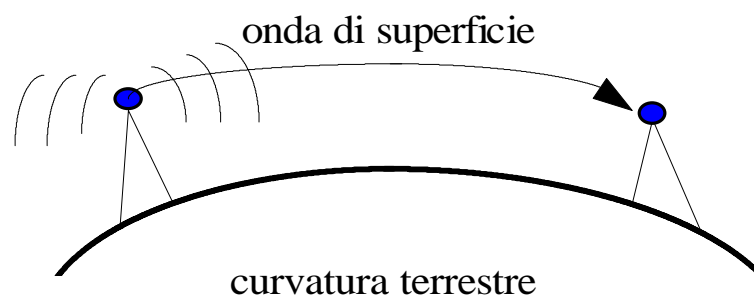
Le proprietà delle onde radio dipendono dalla frequenza:

- a basse frequenze, le onde radio passano bene attraverso gli ostacoli, anche se la potenza decade con il cubo della distanza;
- ad alte frequenze, le onde radio tendono a viaggiare in linea retta e rimbalzano sugli ostacoli;
- a tutte le frequenze, le onde radio sono soggette ad interferenza con motori o altre apparecchiature elettriche.

A causa proprio della loro capacità di viaggiare su lunghe distanze, le onde radio presentano il rilevante problema dell'**interferenza** tra segnali appartenenti a servizi diversi e, nell'ambito di uno stesso servizio, ad utenti diversi; per questo motivo, tutti i governi concedono avaramente la licenza agli utenti di trasmettitori radio.

Propagazione delle onde radio

Nelle bande **VLF** (*Very Low Frequency*, sotto i 30 kHz), **LF** (*Low Frequency*, 30 ÷ 300 kHz) ed **MF** (*Medium Frequency*, 300 ÷ 3000 kHz), le onde radio tendono a seguire il terreno (si parla perciò di **onde di superficie**), come illustrato nella figura seguente:



L'onda di superficie si ha quando le antenne TX e RX si trovano molto vicino al suolo, ad altezza relativamente piccola rispetto alla lunghezza d'onda della stazione

emittente. Questo tipo di onde si propagano rasente al suolo, seguendo la curvatura della superficie terrestre.

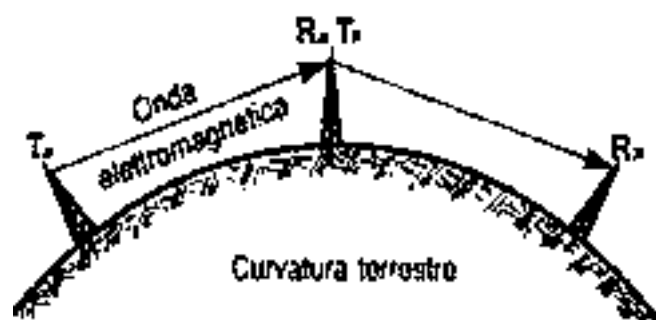
Il percorso che esse possono compiere è essenzialmente limitato dall'assorbimento di energia esercitato dal suolo: infatti, il suolo in parte assorbe ed in parte riflette le onde che si propagano lungo di esso.

L'attenuazione subita da queste onde è tanto maggiore quanto più è elevata la frequenza. La distanza del singolo collegamento può essere perciò anche di 1000 km per le frequenze più basse, mentre scende per frequenze maggiori.

La trasmissione **radio AM** usa proprio la banda MF: le onde radio in questa banda ed in quelle adiacenti passano facilmente attraverso gli edifici e questo spiega il perchè le *radio portatili* funzionano all'interno. Il problema principale di queste bande è invece quello per cui la loro ampiezza è troppo bassa per la trasmissione dati.

Se saliamo in frequenza, passando nelle bande **HF** (*High Frequency*, 3 ÷ 30 MHz) e **VHF** (*Very High Frequency*, 30 ÷ 300 MHz), si utilizza spesso la cosiddetta **onda spaziale diretta**, che si ha quando le antenne TX e RX si trovano ad una altezza dal suolo superiore rispetto alla lunghezza d'onda del segnale trasmesso. L'altezza sarà tale che le antenne si potranno considerare in **visibilità radio** (nel senso che quella RX è in grado di ricevere i segnali provenienti da TX).

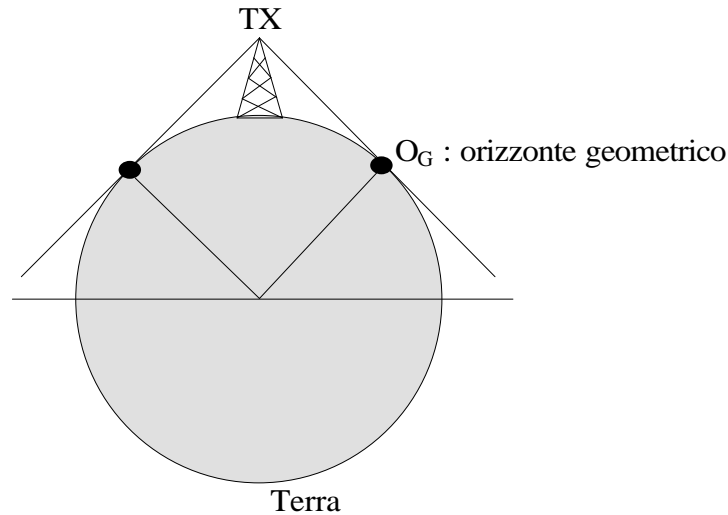
Un esempio è quello della figura seguente, in cui è riportato un **ponte radio a due tratte**, in cui cioè il trasmettitore ed il ricevitore comunicano tramite un **ripetitore** posto tra di essi:



Dato che TX e RX non sono in visibilità radio tra di loro, il ripetitore posto nel centro è in visibilità radio con entrambi e quindi comunica con essi tramite onde dirette.

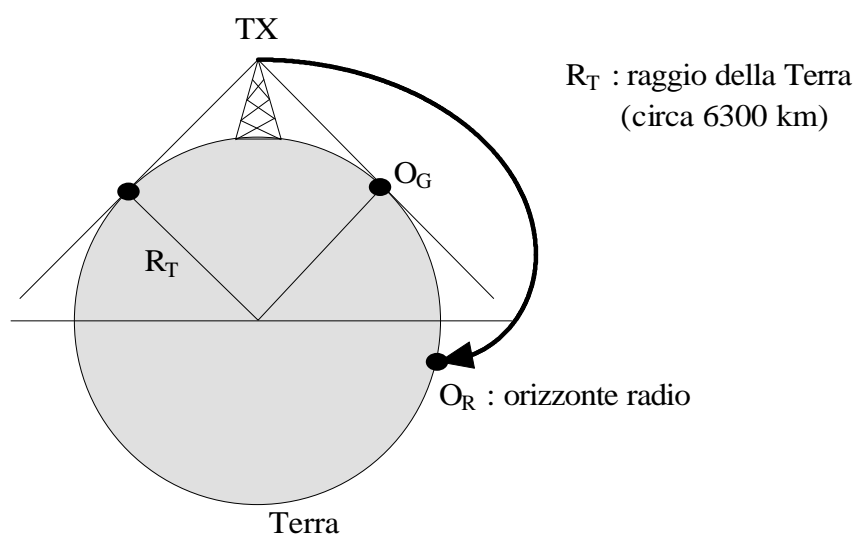
E' importante chiarire il concetto di **visibilità radio**: se immaginiamo che le onde elettromagnetiche irradiate da un trasmettitore TX si propaghino secondo linee

rette (il che è tanto più vero quanto maggiore è la frequenza delle onde), appare evidente che la comunicazione con un eventuale ricevitore RX può avvenire solo se RX stesso si trova ad una distanza non superiore a quella del cosiddetto **orizzonte geometrico** di TX:



Se RX si trovasse oltre l'orizzonte geometrico del TX (cioè non in **visibilità ottica**), non ci sarebbe alcun collegamento.

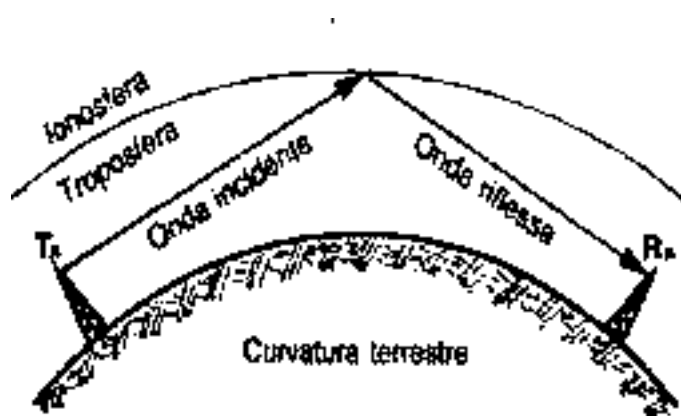
In realtà, i raggi elettromagnetici che partono dal TX non si propagano normalmente in linea retta, ma seguono delle traiettorie curvilinee, la cui curvatura dipende da come varia l'**indice di rifrazione** dell'atmosfera lungo il cammino che percorrono. Questa curvatura è un grosso vantaggio in quanto, sotto certe condizioni, essa consente di coprire distanze maggiori rispetto all'orizzonte geometrico. In particolare, il limite a tali distanze è il cosiddetto **orizzonte radio**:



Per questo motivo, anziché parlare di visibilità ottica (RX posto non oltre l'orizzonte geometrico), si deve parlare di **visibilità radio** (RX posto non oltre l'orizzonte radio).

Torniamo adesso al discorso delle onde dirette. Esse vengono di solito impiegate per frequenze superiori ai 30 MHz (detta **frequenza critica**), cioè con lunghezza d'onda inferiore a 10 metri. Ad esempio, sono usate nelle trasmissioni **TV** e **radio FM**.

Per le onde radio con frequenza elevata ma comunque inferiore al valore critico di 30 MHz, si presenta anche un altro importante fenomeno: alcune di queste onde raggiungono la **ionosfera** (uno strato di particelle cariche che circonda la Terra ad una altezza da 60 a 500 km) e sono da essa riflesse e rispedite verso il suolo. Ad esempio, la figura seguente mostra lo stesso ponte radio dell'ultima figura, ma realizzato sfruttando proprio la **riflessione ionosferica**:



In pratica, quindi, si sfrutta il meccanismo della riflessione ionosferica al fine di coprire distanze di collegamento che altrimenti richiederebbero l'uso di ripetitori del tipo prima considerato. Vediamo allora di capire meglio come si procede.

La Terra non è circondata completamente dal vuoto, ma da un grande involucro d'aria detto **atmosfera**, che a sua volta si distingue in:

- **troposfera** (dalla crosta terrestre fino a circa 16 Km di altezza con temperature da + 15°C fino a - 55°C);
- **stratosfera** (da 16 Km a 60 Km, con temperature da - 55°C a 0°C , poi a + 50°C ed infine di nuovo a -75°C);
- **ionosfera** (oltre i 60 Km con temperature da - 75°C a + 1000°C);
- **esosfera** (oltre i 480 Km).

Nella ionosfera si individuano poi una serie di strati: strato **D** (da 60 a 80 Km), presente solo di giorno, strato **E** (da 90 a 130 Km), strato **F1** (da 180 a 220 Km), strato **F2** (da 220 a 500 Km). Durante la notte gli strati F1 ed F2 si uniscono in un unico strato **F** localizzato tra 250 e 350 Km.

La ionosfera viene così chiamata perché, quando quella zona di atmosfera viene ad essere colpita dalle radiazioni ultraviolette emesse dal sole, diviene ionizzata. La ionizzazione varia nell'arco della giornata (è massima a mezzogiorno) e nell'arco delle stagioni (è massima d'inverno).

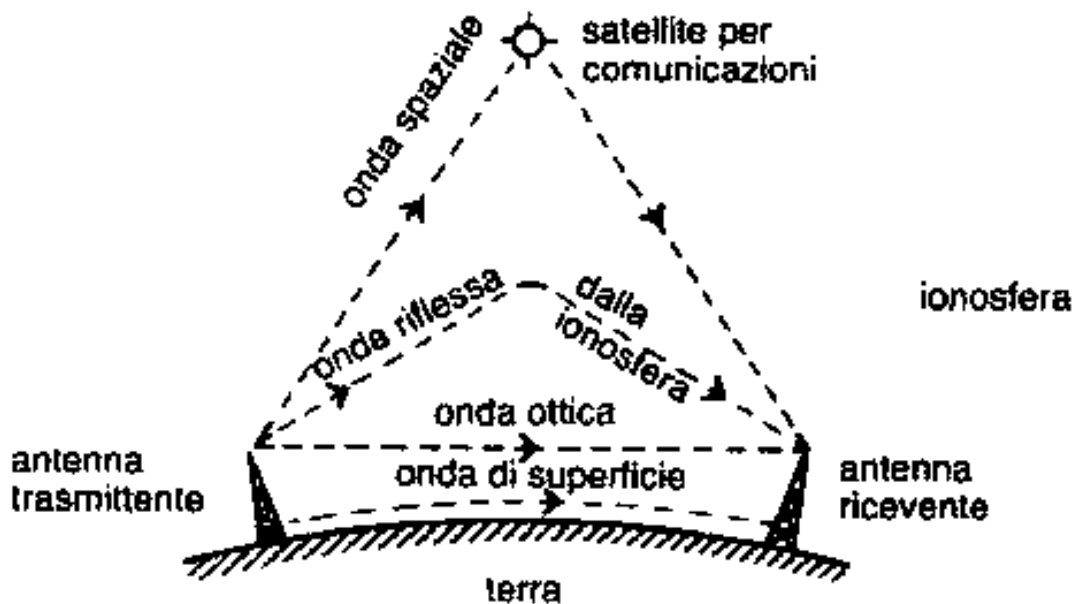
Gli strati prima citati sono caratterizzati da un diverso **grado di ionizzazione** e tra quelli più bassi vi sono fasce di separazione a bassa ionizzazione che modificano l'angolo di rifrazione dell'onda. Quando l'onda elettromagnetica emessa dal TX penetra in zone successivamente più ionizzate, subisce spostamenti rispetto alla sua traiettoria normale, tanto più rilevanti quanto più intensa è la ionizzazione. Quando la deviazione subita dall'onda incidente raggiunge e supera i 90° , essa non può più penetrare nello strato ionizzato e viene da questo totalmente riflessa. L'onda riflessa, attraversando nel suo ritorno alla Terra strati successivamente meno ionizzati, modifica la propria direzione, rendendola piano piano rettilinea, in modo da uscire dallo strato riflettente con un angolo pari a quello incidente.

La **riflessione totale** di un'onda a radiofrequenza, da parte dello strato ionizzato, dipende, oltre che dalla frequenza del segnale, anche dalla densità di ionizzazione degli strati atmosferici e dall'angolo di incidenza nella ionosfera.

Sotto certe condizioni atmosferiche, le onde possono anche rimbalzare parecchie volte e con questo coprire distanze notevoli. I **radioamatori** usano queste bande per comunicare a lunga distanza, come del resto fanno anche i militari, che usano proprio le bande HF e VHF.

Trasmissione a microonde

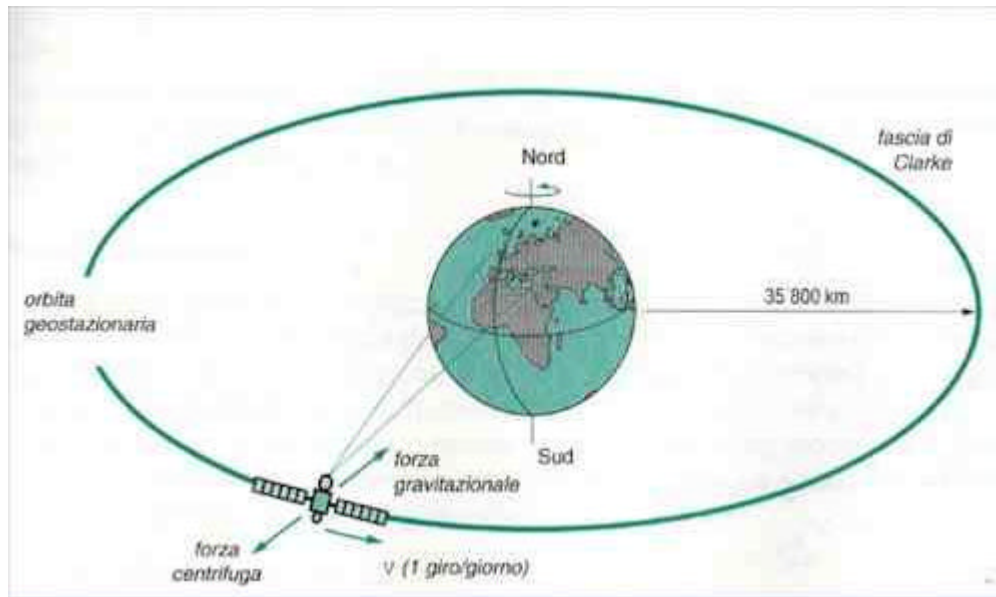
Volendo riepilogare quanto detto nel precedente paragrafo, possiamo affermare che le onde elettromagnetiche, una volta irradiate dall'antenna trasmittente, possono raggiungere l'antenna ricevente in vari modi, come illustrato nella figura seguente:



In questa figura, oltre le già citate onde di superficie, onde dirette (o ottiche) e onde riflesse dalla ionosfera, è stata anche indicata una quarta possibilità, che è quella dell'**onda spaziale riflessa dai satelliti**: essa si ha quando un segnale viene volutamente inviato nello spazio con un angolo incidente molto piccolo (in modo da "bucare" l'atmosfera) ed indirizzato in un punto preciso dello spazio in cui è allocato un **satellite geostazionario**. Quest'ultimo, mantenendo rigorosamente costante la posizione nei confronti della Terra, si comporta come se fosse un'antenna di enorme altezza (circa 36.000 Km) capace di "riflettere" il segnale verso la Terra ⁽⁵⁾.

La ricezione a terra, da parte di impianti fissi, dei segnali irradiati da satelliti è possibile solo se i satelliti appaiono immobili nello spazio. Ciò accade quando essi descrivono *orbite di rivoluzione* circolari e caratterizzate da una velocità angolare corrispondente a quella terrestre. Una tale orbita, detta appunto **geostazionaria**, è caratterizzata da un raggio di circa 42.106 km dal centro della Terra, vale a dire circa 35.800 km dalla superficie terrestre. Su quest'orbita, la forza di attrazione esercitata dalla Terra sul satellite è perfettamente bilanciata dalla forza centrifuga conseguente alla velocità angolare di 1 giro/giorno; la velocità di spostamento del satellite sull'orbita geostazionaria è pari a circa 11.000 km/h.

⁵ Il satellite si comporta in effetti come antenna ricevente per i segnali che giungono da Terra e da antenna trasmittente per i segnali che da essa vengono poi irradiati verso Terra.



La posizione del satellite sull'orbita geostazionaria, detta **fascia di Clark** (dal nome dello scienziato che per primo, nel 1945, ipotizzò la possibilità di un servizio radiotelevisivo "mondiale" tramite tre satelliti distanti 120°), è misurata in gradi rispetto al *meridiano di Greenwich*, con segno negativo a Ovest e positivo a Est di questo.

Il sistema di comunicazione appena descritto è possibile in quanto, al di sopra dei 300 MHz (ma in realtà il discorso vale approssimativamente già dai 100 MHz), le onde elettromagnetiche (dette in questo caso **microonde**) viaggiano praticamente in linea retta e possono perciò essere fortemente direzionate. Concentrando tutta l'energia su un piccolo raggio tramite una **antenna parabolica** (del tipo usato per il broadcast TV via satellite), si ottiene un rapporto S/N decisamente elevato, anche se c'è il problema di allineare accuratamente le antenne riceventi e trasmettenti. Inoltre, questa direzionalità permette a trasmettitori multipli, allineati in fila, di comunicare con ricevitore multipli, anch'essi in fila, senza apprezzabili interferenze reciproche. Prima dell'avvento delle fibre ottiche, queste tecniche basate sulle microonde hanno formato il cuore del sistema di trasmissione telefonica a lunga distanza.

Le microonde sono usate anche per i **ponti radio terrestri**. Dato che le microonde viaggiano in linea retta, se le due torri su cui sono montate le antenne TX e RX sono troppo distanti, la Terra costituisce un ostacolo, per cui, come già visto per le onde radio, è necessario usare uno o più **ripetitori** intermedi. E' ovvio che, quanto più alte sono le torri, tanto maggiore sarà la distanza alla quale possono essere poste. La distanza tra i ripetitori cresce all'incirca come la radice

quadrata dell'altezza delle torri: ad esempio, due torri alte 100 m possono essere distanziate di circa 80 km.

A differenza delle onde radio a bassa frequenza, le microonde non attraversano bene gli edifici. Inoltre, nonostante il raggio possa essere ben direzionato sul trasmettitore, esiste comunque un po' di **dispersione** nello spazio; non solo, ma alcune onde possono essere rifratte dagli strati bassi dell'atmosfera e impiegare più tempo delle onde dirette per raggiungere il ricevitore; percorrendo percorsi diversi, le varie onde giungono al ricevitore con differenze di fase; se tali differenze sono vicine ai 180°, la somma è distruttiva. Questo effetto è noto come **multipath fading** (*attenuazione da cammini multipli*) ed è spesso un problema. Esso dipende dal tempo e dalla frequenza. Ci sono vari rimedi: ad esempio, alcuni operatori mantengono liberi un certo numero di canali di riserva su cui spostare le comunicazioni quando il multipath fading cancella temporaneamente alcune bande di frequenza (tecnica della **diversità in frequenza**). In altri casi, si usano due antenne in ricezione, distanziate opportunamente, in quanto è poco probabile che il multipath fading affligga lo stesso segnale su entrambe le antenne (tecnica della **diversità nello spazio**).

La richiesta di sempre maggiore spettro induce a migliorare la tecnologia, al fine di rendere possibili trasmissioni a frequenze sempre più alte: ad esempio, sono ormai di uso comune le bande fino a 10 GHz. Tuttavia, fino a circa 8 GHz si pone un problema rilevante: l'assorbimento da parte dell'acqua. Infatti, le onde con frequenza così alta hanno una lunghezza d'onda molto bassa (pochi centimetri) e sono perciò assorbite dalle gocce di pioggia. Anche in questo caso, il rimedio spesso adottato è quello di chiudere i collegamenti in alta frequenza in presenza di pioggia ed usare altri canali di riserva, su cavo o ancora via radio ma a frequenza più bassa.

In generale, le microonde sono molto usate per la comunicazione telefonica su lunghe distanze, per i sistemi radiomobili cellulari, per le trasmissioni televisive ed altro. La trasmissione a microonde presenta tutt'oggi alcuni vantaggi rispetto alle fibre ottiche: il principale è evidentemente quello di non aver bisogno di diritti di passaggio, in quanto basta comprare un piccolo pezzo di terreno ogni 50 km e piazzarvi una torre a microonde. Inoltre, gli impianti alle microonde sono relativamente poco costosi: mettere insieme due semplici torri (ad esempio due grossi pali con 4 tiranti) e piazzare antenne su ciascuno di essi può essere più conveniente che interrare 50 km di fibra attraverso un'area urbana altamente congestionata oppure su una montagna; anche l'affitto di una fibra presso una società telefonica potrebbe risultare più oneroso.

Oltre ad essere usate per le trasmissioni a lunga distanza, le microonde hanno un importante utilizzo, nelle cosiddette **bande industriali-scientifiche-mediche**; queste bande sono l'unica eccezione alle regole di rilascio della licenza: infatti, i trasmettitori che le usano non hanno bisogno della licenza del governo. In tutto il mondo, la banda riservata a questi scopi è quella da 2.4 a 2.484 GHz. In altri paesi sono state riservate altre bande.

Onde infrarosse e millimetriche

Le **onde a infrarossi** e le **onde millimetriche** non guidate sono molto usate per comunicazioni a piccola distanza: i telecomandi usati per le TV, i videoregistratori e gli stereo usano tutti comunicazioni infrarosse.

Sono onde elettromagnetiche relativamente direzionali e richiedono l'uso di apparati semplici ed economici da costruire. Hanno però un difetto fondamentale: non passano attraverso gli oggetti (basti pensare che non è possibile cambiare canale alla TV se interponiamo un oggetto sufficientemente esteso tra il telecomando e la TV stessa). Possiamo affermare che, in generale, man mano che ci spostiamo sullo spettro elettromagnetico verso la luce visibile, le onde si comportano sempre più come **luce**, che notoriamente risente della presenza degli ostacoli.

D'altra parte, il fatto che le onde infrarosse non passino bene attraverso ostacoli solidi può anche essere un vantaggio: ad esempio, un sistema di comunicazione ad infrarossi in una stanza non interferirà con un sistema simile in una stanza adiacente e quindi saranno anche molto difficili le intercettazioni abusive. Proprio per queste ragioni, non sono necessarie licenze governative per far funzionare un sistema ad infrarossi, al contrario di quanto visto per le onde radio.

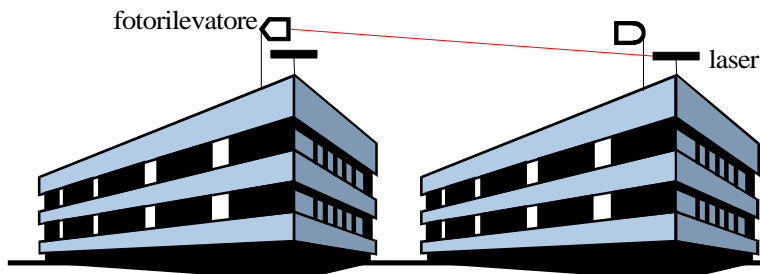
Queste proprietà hanno reso le onde ad infrarossi un buon candidato per **reti LAN senza filo**. Ad esempio, i PC e gli uffici di un edificio possono essere equipaggiati con trasmettitori e ricevitori a infrarossi, in modo che i PC possano ad esempio collegarsi alla LAN locale senza connettersi fisicamente e magari anche spostandosi all'interno dell'edificio.

Più in piccolo, sono già da tempo in commercio periferiche (come mouse o stampanti) in grado di comunicare con il PC tramite un collegamento ad infrarossi: il vantaggio è quello di non avere fili, mentre l'unica difficoltà è sempre quella per cui TX ed RX devono essere in "visibilità" uno dell'altro.

La comunicazione ad infrarossi non può essere usata all'esterno, in quanto il sole emana radiazioni negli infrarossi tanto quanto nello spettro visibile.

Trasmissione ad onde luminose

I **segnali ottici non guidati** sono stati in uso per molto tempo. Una delle applicazioni più moderne consiste nel connettere ad esempio le LAN di due edifici attraverso dei **laser** montati sui tetti:



Il grosso vantaggio è che le onde luminose sono inerentemente unidirezionali, per cui basta dotare ciascun edificio di un laser e di un **fotorilevatore**. Inoltre, a queste frequenze così elevate, la larghezza di banda è molto grande (per cui sono possibili data rate elevati) ed anche molto economica.

Del resto, la potenza del laser, cioè di un raggio luminoso molto sottile, è anche la sua debolezza: infatti, riuscire a puntare un raggio laser largo 1 mm su un bersaglio di 1 mm a distanza di 500 metri risulta alquanto problematico. Per questo motivo, si usano spesso delle **lenti** per sfuocare (allargare) il raggio.

Un altro svantaggio è che il raggio laser non può passare attraverso la pioggia o la fitta nebbia, mentre può lavorare generalmente bene nei giorni di sole. Tuttavia, nei giorni più caldi, può verificarsi il seguente problema: il calore del sole durante il giorno causa *correnti di convezione* che si sollevano dai tetti degli edifici; quest'aria turbolenta può deviare un raggio laser proveniente da un altro edificio e quindi impedirgli di raggiungere il rilevatore o, peggio, può farlo "ballare" intorno ad esso. Questi stessi effetti sono quelli che causano, ad esempio, l'apparente tremolio delle strade nei giorni caldi oppure le immagini tremolanti quando si guarda vicino ad un radiatore bollente.

Autore: **Sandro Petrizzelli**

e-mail: sandry@iol.it

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>